

Fotovoltaisk statusreport 3

Sørensen, Bent

Publication date:
1995

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

Citation for published version (APA):
Sørensen, B. (1995). *Fotovoltaisk statusreport 3*. Roskilde Universitet. Tekster fra IMFUFA No. 292

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain.
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact rucforsk@kb.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



FOTOVOLTAISK STATUSNOTAT 3

Bent Sørensen

Rapport fra fase 3 af projektet "Internationalt fotovoltaisk samarbejde",
der udføres for Energistyrelsen under kontrakt nr. 51181/94-0002.

TEKSTER fra

IMFUFA

ROSKILDE UNIVERSITY • INSTITUTE 2

INSTITUTE OF STUDIES IN MATHEMATICS AND PHYSICS, AND THEIR
FUNCTIONS IN EDUCATION, RESEARCH AND APPLICATIONS

ROSKILDE UNIVERSITY, P O BOX 260, DK-4000 ROSKILDE, DENMARK

TEL: (+45) 46 757 711, FAX: (+45) 46 755 065, TELEX 43158.

INSTITUTE OF STUDIES IN MATHEMATICS AND PHYSICS, AND THEIR FUNCTIONS
IN EDUCATION, RESEARCH AND APPLICATION.

26. Februar 1995

FOTOVOLTAISK STATUSNOTAT 3

by Bent Sørensen

IMFUFA text no. 292, 36 pages.

ISSN 0106 6242

ENGLISH ABSTRACT:

The purpose of this report series is to inform Danish interest groups on the progress in photovoltaic research and developments abroad. The present report no. 3 focusses on two main topics. One is the architectural integration of photovoltaics in buildings, and the other the recent scientific progress in the direction of dramatic price decreases by several novel ideas on cell structure, materials and manufacture. Remarks will also be made on how the ongoing transformation of the utility sector may influence the use of photovoltaics in central plants. This work is supported by the Danish Energy Agency under contract 51181/94-0002.

At the end, two English-language reports are appended, taken from the Danish contributions to the First World Conference on Photovoltaics held in November 1994 in Kona, USA:

Danish National Photovoltaic Program, by Ivan Katic, Bent Sørensen and Jens Windeleff

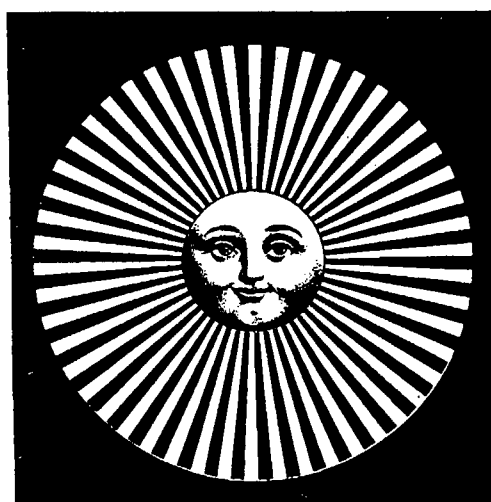
The Waffle: A new Photovoltaic Diode Geometry having high efficiency and backside contacts, by Otto Leistiko (reprinted by permission).

FOTOVOLTAISK STATUSNOTAT 3

Bent Sørensen

Frbruar 1995

Rapport fra fase 3 af projektet
"Internationalt fotovoltaisk samarbejde",
der udføres for Energistyrelsen under
kontrakt nr. 51181/94-0002.



Forord

Denne 3. rapport i serien Fotovoltaiske Statusnotater er opbygget ligesom de foregående, dvs med en eller to små artikler om udvalgte emner, efterfulgt af beskrivelser af projekter og udviklinger hos samarbejds- eller besøgs partnere i enkeltlande. Der afrundes med forfatterens refleksioner over de beskrevne emner, en liste over faktiske besøg og samarbejder, med gengivelse af udvalgte publikationer udfærdiget i perioden. Formålet med denne struktur blev beskrevet således i forordet til det første statusnotat:

"Denne rapport er knyttet til et projekt der dels sigter på "videnhjemtagning", altså at fremstille vigtige landvindinger på solcelleområdet, gjort i udlandet, for danske interessenter. Interessenterne er ikke så meget forskere på solcelleområdet (de formodes selv at opsøge resultaterne i den internationale fagpresse eller gennem personlige kontakter), som mere udviklere og bredt interesserede folk, som ikke har mulighed for eller tid til selv at opsøge originallitteraturen. Også beslutningstagere på det bevillingsmæssige område kan have interesse af dette forsøg på at granske et helt område og give et overskueligt kondensat af nogle vigtige træk.

Det andet område, der sigtes på, er konkret samarbejde med solcelle-forskningsgrupper i udlandet. Synspunktet er her, at videnhjemtagning i sig selv ikke er interessant, hvis ikke færdigheder samtidigt overføres til modtageren. Og dette kræver et mere ligeværdigt samarbejde. Dette er også i mange tilfælde nødvendigt for overhovedet at få adgang til de nyeste forskningsresultater. Noget for noget! Vi må tilføre vor viden før vi kan vente at de udenlandske forskningscentre åbner op for de dybere lag af deres erfaringer. Her er det klart, at det danske bidrag hovedsageligt vil ligge på det område, hvor vi har opbygget en ledende forskningsindsats, nemlig systemaspekter ved solcelleteknologien."

Her i den 3. statusrapport er der fokuseret på to problemstillinger. Den ene er integrering af solceller i arkitektur, en udfordring til både teknikere og arkitekter, som både er spændende og vigtig, hvis solcelleteknologien skal vinde indpas i stor stil. Det andet hovedspørgsmål som drøftes, er de teknologiske gennembrud der kan bringe solcelleenergi ned i samme prisniveau som konventionel el-fremstilling. Konturen af sådanne gennembrud er tegnet i løbet af det sidste år, som det vil fremgå af f.eks. afsnittet om forskning og udvikling i Australien.

Denne rapports undersøgelser er baseret på samarbejde med og gensidige besøg af forskere i de omhandlede lande, støttet bl.a. af en bevilling fra Energistyrelsens 7. kontor, og udgør samtidig afrapportering af dette projekt "Internationalt fotovoltaisk samarbejde, fase 3". Det er den sidste fase i projektet, så måske burde dette også være det sidste statusnotat. Imidlertid har interessen for denne type orientering været stor, og muligheder for fortsat at kunne udgive sådanne skrifter, når betydelige fremskridt er sket på solcelleområdet udenfor Danmark, undersøges derfor.

FOTOVOLTAISK STATUSRAPPORT 3

Indhold

Forord	5
1 FOKUS	8
1.1 Fotovoltaisk arkitektur.	8
1.2 Rundtur til gode og dårlige solcelle-løsninger	9
1.3 Nogle forslag til principper for solcelleintegration	15
2 PROJEKTER	18
2.1 Italien	18
2.1.1 Verdens største solcellekraftværk	18
2.2 Australien	19
2.2.1 Stakkede polykrystallinske celler	19
2.3 USA	21
2.3.1 Omstrukturering af solcelleforskningen og nye ideer.	21
2.4 Schweiz	23
2.4.1 Solceller baseret på organiske farvestoffer.	23
2.5 Japan	24
2.6 Tyskland, Holland, Frankrig, England og Finland	24
3 REFLEKTIONER	25
LITTERATUR	28
APPENDIX	29
A.1 Aktiviteter relateret til dette projekt	29
A.2 Danish National Photovoltaic Program	30
A.3 The Waffle: A new PV diode geometry having high efficiency and backside contacts	34

1. FOKUS

1.1 Fotovoltaisk arkitektur

Fokus retter denne gang øjnene mod fotovoltaisk arkitektur. Der er bred enighed om, at integrering af solceller i bygninger bliver et af de første interessante områder for nettilsluttede solcellesystemer i Danmark, med gennembrud måske allerede i løbet af de næste ti år. Det er således allerede nu nødvendigt at forberede os på at kunne bygge såvel nye som renovere eksisterende bygninger med fotovoltaiske paneler anbragt på en visuelt spændende måde, og ihvertfald som minimum på en arkitektonisk forsvarlig manér.

Danske arkitekter har vist at de kan hævde sig på et højt plan set med internationale øjne, og der er ingen tvivl om, at de principielt kan løfte den opgave, som solcellerne byder på. Her skal tænkes i bygningsflader med en karakter der er anderledes end vi er vant til. Nye udfordringer, men også muligheden for at havne i en grim og sjusket indpasning af den nye energiforsyningsmulighed. Det er klart at danske arkitekter må efteruddannes på dette område, men jeg tror, at der skal mere til. Det er jo sådan, at mens de bedste danske arkitekter har glimret i udlandet med utraditionelle løsninger af høj arkitektonisk kvalitet, så har arbejdsforholdene indenfor Danmark været mere beskedne: Det meste byggeri har været meget skrabet, og økonomiske hensyn har ofte begrænset fantasien i en grad som er beklagelig set udfra næsten ethvert perspektiv. Andre områder af Europe og verden udenfor vores kontinent har haft kræfter til at eksperimentere (hvilket betyder at det ikke lykkes hver gang), mens eksperimenter i Danmark nærmest har drejet sig om at bruge ny, uprøvede men billige byggematerialer, som så senere har vist sig ikke at leve op til elementære krav, og derfor har krævet dyre efterarbejder. Det er på denne baggrund svært at tilslutte sig kravet om det billigst mulige byggeri, som bl.a. medfører at skønt Danmark er et af verdens rigeste lande, så er kvaliteten af vores byggeri i arkitektonisk henseende langt under den, som findes i lande vi normalt sammenligner os med.

En ændring af dette forhold kræver naturligvis et nyt syn på byggeri: danskere tilbringer megen tid indendøre, og har derfor traditionelt gjort meget ud af indretningen af boliger og arbejdslokaler. Men den ydre arkitektur har der ofte ikke været råd til at gøre noget ud af. Samtidig er bygninger i Danmark langt billigere end i mange andre europæiske lande, med gode grunde eller undskyldninger, fordi danskernes fordel af arbejdsindtægten på forskellige typer af udgifter er forskellig fra nabolanden: der bruges lønindtægter på sociale goder, som i udlandet forlanges betalt direkte af arbejdsgiveren. Dagligdagens leveudgifter er høje, mens selve boligen for de fleste danskere højst må koste ca. 25% af bruttoindtægten.

Sæt at vi kunne ændre dette, og sæt at danske arkitekter kunne lære at lave energirigtige bygninger. Ja, også på det sidste område skorter det, skønt forudsætningerne har været kendt i årtier og skønt behovet er stort, set i et nationaløkonomisk perspektiv. Mange nybygninger fra de sidste årtier har udover hvad bygningsreglementet kræver totalt negligeret energiforsynings krav og muligheder: Der observeres store overflader i forhold

til rumfanget, og bygnings-orientering som ikke tager hensyn til solindfald og muligheden for at udnytte sollyset gennem passivt design. Der er i det meste byggeri dårlige muligheder for at integrere solfangere, og i mange tilfælde ses brug af bygningselementer, som kunne have haft en energifunktion men ikke har det (ovenlys, atrium-arealer, osv.).

1.2 Rundtur til gode og dårlige solcelle-løsninger

Figur 1 til 24 giver en række eksempler på integrering af solceller i bygninger i forskellige lande. De første seks figurer viser én-familieboliger fra Holland, Finland, Tyskland, Japan og Danmark.

Figur 1 viser et hollandsk nulenergihus med 30 m² solceller og 12 m² termiske solfangere. Valget af polykrystallinske solceller med farvespil harmonerer dårligt med de lyst fugede røde og blå mursten og den generelt uharmoniske farve- og materialesammensætning. Hele huset giver et rodet indtryk, med alt for mange forskelligartede komponenter. For at sætte prikken på i'et er der to "tårne" opført med en tredje slags mursten.

I Figur 2 ses et finsk fritidshus, hvor en tagflade er belagt med solceller. Dette giver et roligt indtryk, som kun adskiller sig fra traditionelle tagflader ved, at træerne spejler sig i solcellerne. Iøvrigt er placeringen under træer noget tvivlsom hvad angår optimering af solindfald.

Det tyske tofamiliehus vist på Figur 3 er på sin vis arkitektonisk gennemtænkt (måske lige bortset fra den påklistrede carport). Imidlertid er der anvendt påde solceller, termiske solfangere og glasoverdækning på en veranda, i et forløb som virker rodet, fordi de tre flader støder op mod hverandre uden harmonisering. Det havde været bedre, hvis de alle tre havde haft den samme horisontale udstrækning.

Figur 4 viser et tysk enfamiliehus ved Ensheim. Det udviser en smuk integration af solcelletagene, og arkitekturen er forøvrigt næsten identisk med den som findes i et af verdens første solenergi huse, Decade-80 Solar House i Tucson, Arizona, der blev bygget i 1975, men med solvarmepaneller og kun et enkelt solcellepanel (Sørensen, 1977). Eneste anke er at de mange hus-dele giver et stort opvarmningsbehov under tyske forhold (hvorimod bygnings-stilen var godt tilpasset klimaet i Arizona).

Det japanske hus i Figur 5 har en solcelle-saddel, som kun dækker to tredjedele af huset. Ikke noget eksempel til efterligning.

Figur 6 viser den danske Villa Vision i Tåstrup, som på smuk måde integrerer solcellerne i den utraditionelle arkitektur med solsejl til afskærmning af center-rummet.

Det hollandske rækkehus vist i Figur 7 har en traditionel udformning. Man kan undre sig over den store ikke-solcellebelagte stribe øverst på taget. Godtnok kan det være en god ide at holde tagryggen fri for solceller, men det kan gøres langt elegantere, som



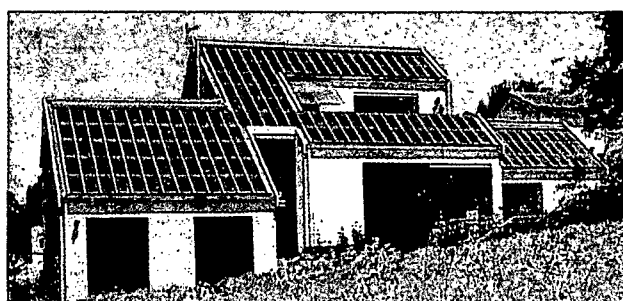
Figur 1. Hollandsk nulenergihus.



Figur 2. Fritidshus i Finland



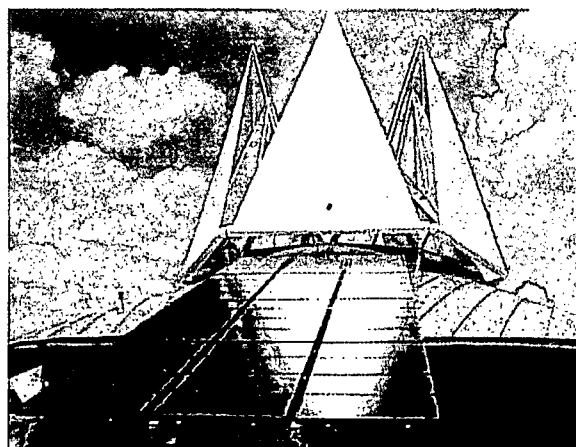
Figur 3. Tysk hus med solceller og solvarmepaneller, Zwickau



Figur 4. Tysk solcellehus i Ensheim



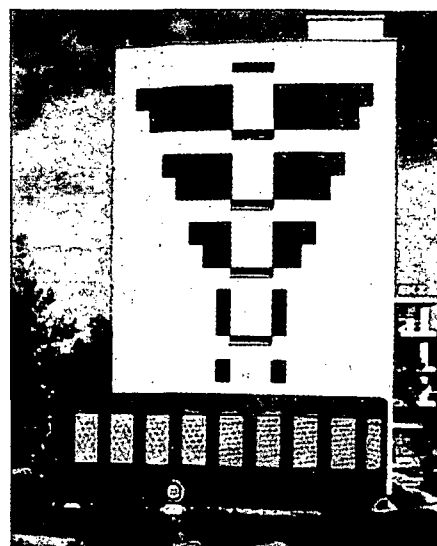
Figur 5. Japansk installation



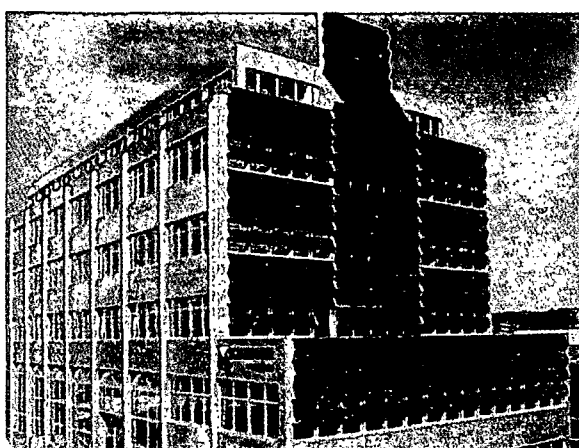
Figur 6. Villa Vision, Danmark



**Figur 7. Hollandsk rækkehus
i Heerhugowaard**



**Figur 8. Industribygning i
Dietikon, Schweiz**



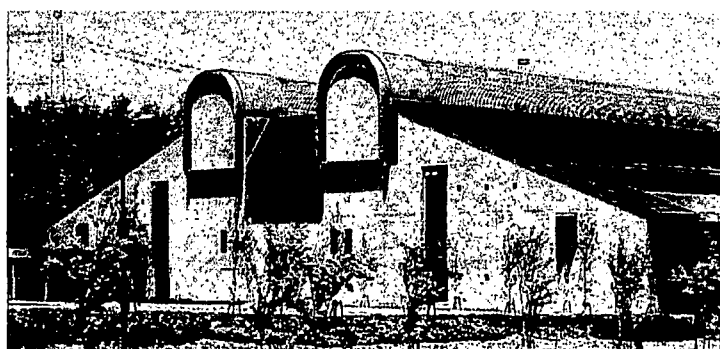
**Figur 9. Industribygning,
Kirchberg, Schweiz**



**Figur 10. Industribygning,
Frederick, Maryland, USA**



**Figur 11. Industribygning,
Bienne, Schweiz**



**Figur 12. Økologisentret for Forskning
og Udvikling, Kyoto, Japan**



Figur 13. Solceller på taget af skole i Japan.



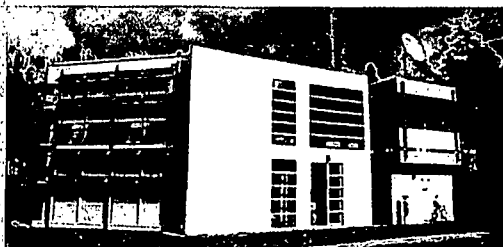
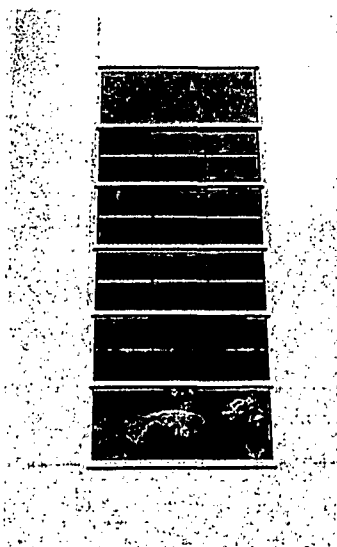
Figur 14. Kontorbygning i Bielefeld, Tyskland.



Figur 15. Solceller i etageboliger, Luisenstadt, Tyskland



Figur 16. Kirketårn med solceller i Steckborn, Schweiz



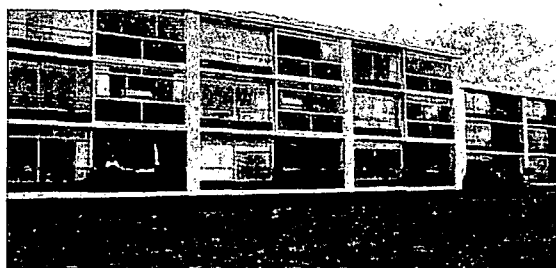
Figur 17a og b. Eksperimentalthus i Porvoo, Finland, med gennemsigtige solcellevinduer.



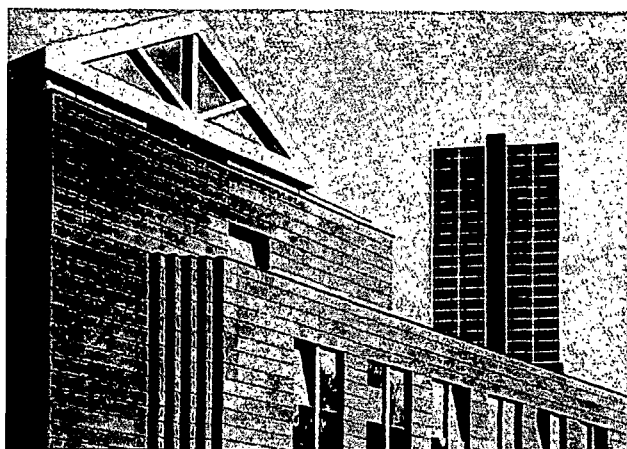
Figur 18. Solhus i Newcastle, UK.



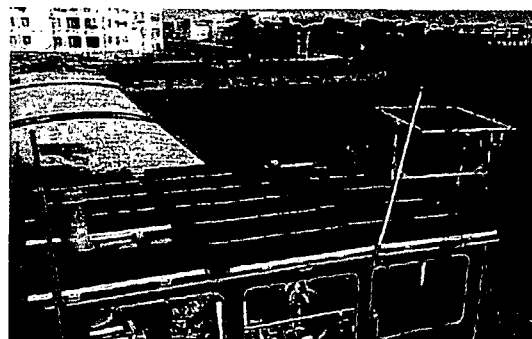
Figur 19. Solcellefacade på kontorbygning i Aachen, set indefra.



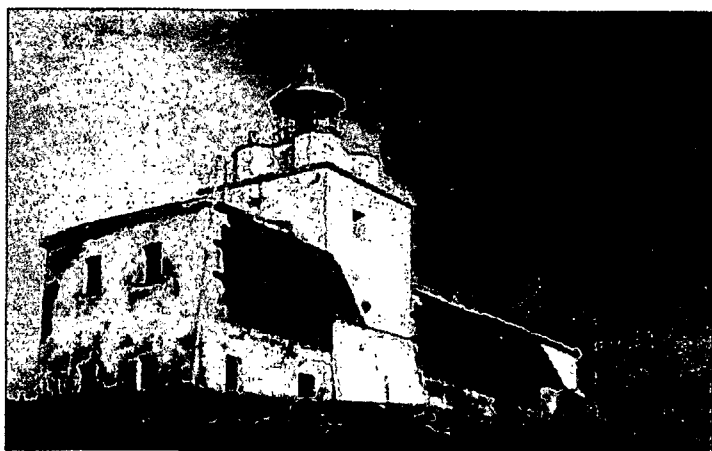
Figur 20. Solceller integreret i altaner (Kolding).



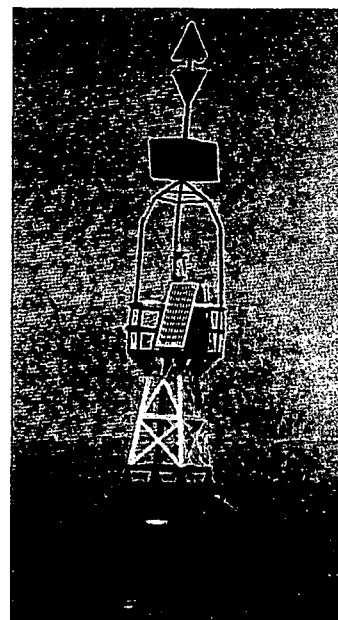
Figur 21. Solceller integreret i bygningstårn i Pirmassen, Tyskland.



Figur 22. Hollandsk solcellepram.



Figur 23. Fyrtårn med solceller i Palmaiola, Italien.



Figur 24. Fransk solcellebøje.

huset vist i Figur 4 illustrerer. Bemærk at disse huse har solcellerne integreret i tagfladen, i modsætning til det japanske hus i Figur 5, hvor solcellerne er monteret ovenpå et almindeligt tag, med tilsvarende dobbeltomkostning.

Figur 8 viser solceller monteret på et elforsyningsselskabs kontorbygning i Dietikoh, Schweiz. Man kan diskutere, om den indiansk inspirerede arkitektur er køn, men vil man lave den slags bemaling af sin facade, så er solceller naturligvis beregnet til formålet.

Den store kontorbygning i Kirchberg, Schweiz, med solceller integreret i solafskærmningen af sydvendte vinduer (Figur 9) repræsenterer en vellykket indpasning. Om man så kan lide den bombastiske arkitektur er en anden sag.

Solcellefabrikanten Solarex' teknologicenter i Maryland (Figur 10) er en ligefrem arkitektonisk udnyttelse af den store sydvendte solcelleflade. Det visuelle indtryk signalerer at firmaet sælger solceller, og en anden type virksomhed ville måske ikke have valgt samme løsning.

Solcellefacaden vist i Figur 11 sidder på en bygning i Schweiz. De anvendte facadeelementer (glas, betonplader og solceller) er lagt i et mønster, som virker roligt, fordi farvevalget af betonen ligger lige mellem glas- og solcellefladerne, så der fremstår tre afstemte grå-blå farvenuancer i facaden.

Figur 12 viser Canons økologicerter ved Kyoto. Her er gjort meget ud af at skjule installationer (fx er ventilationsanlæggets indtag og udblæsning placeret under de halvcirkelformede tagrygge. De mellemliggende tagflader består af solceller, og farvevalget indskrænker sig til enkelte gråtoner. Alt i alt en god løsning for en industriel bygning.

Figur 13 og 15 viser løsninger, hvor solceller er smækket op på hustage uden arkitektoniske hensyn. På de flade tage i Figur 13 har det været muligt at orientere solcellerne efter syd, selvom bygningerne ikke er placerede "solrigtigt".

Figur 14 viser til gengæld en gennemtænkt integrering af solceller i en kontorbygning i Bielefeld (Solcelle-facade producenten Schüco's administrationsbygning). Solcellerne er dels placeret i et vandret lag langs hovedbygningens top, og dels på hele facaden i en tilbygning.

I Figur 16 er solcellerne integreret i et utraditionelt kirketårn, der fremtræder som en skulptur.

Neste's eksperimentarhus i Figur 17 indeholder et fag af gennemskinnelige, amorfe solceller. De fremtræder ligesom bygningens øvrige vinduer og har derfor ikke krævet nogen særlige arkitektoniske tiltag.

Figur 18 viser en harmonisk integrering af solcellefag med optimal hældning, mellem vinduesrækkerne i et kontorhus ved Northumbria Universitet i Newcastle.

Figur 19 viser det indre af en bygning, hvor solceller skifter med glas i facaden, i et har-

monisk mønster (Flachsol's facadepaneler).

Eksemplet i Figur 20 er en dansk altanrenovering, hvor der er indsat solcelle-moduler på nogle af altanforsiderne.

Den smukke integration af solceller i et bygningskompleks i Figur 21 stammer fra et elværks kontorbygning i Pirmassen, Tyskland.

Ovenstående eksempler viser en tendens til, at de arkitektoniske overvejelser i stadig højere grad spiller ind ved nyere solcelleprojekter. Samtidigt udbygges i flere lande også centrale solcelle-installationer (demo-projekter), som i mange tilfælde ikke er underlagt nogen visuel overvejelse, men blot lægges som et felt af paneler, i et øde område.

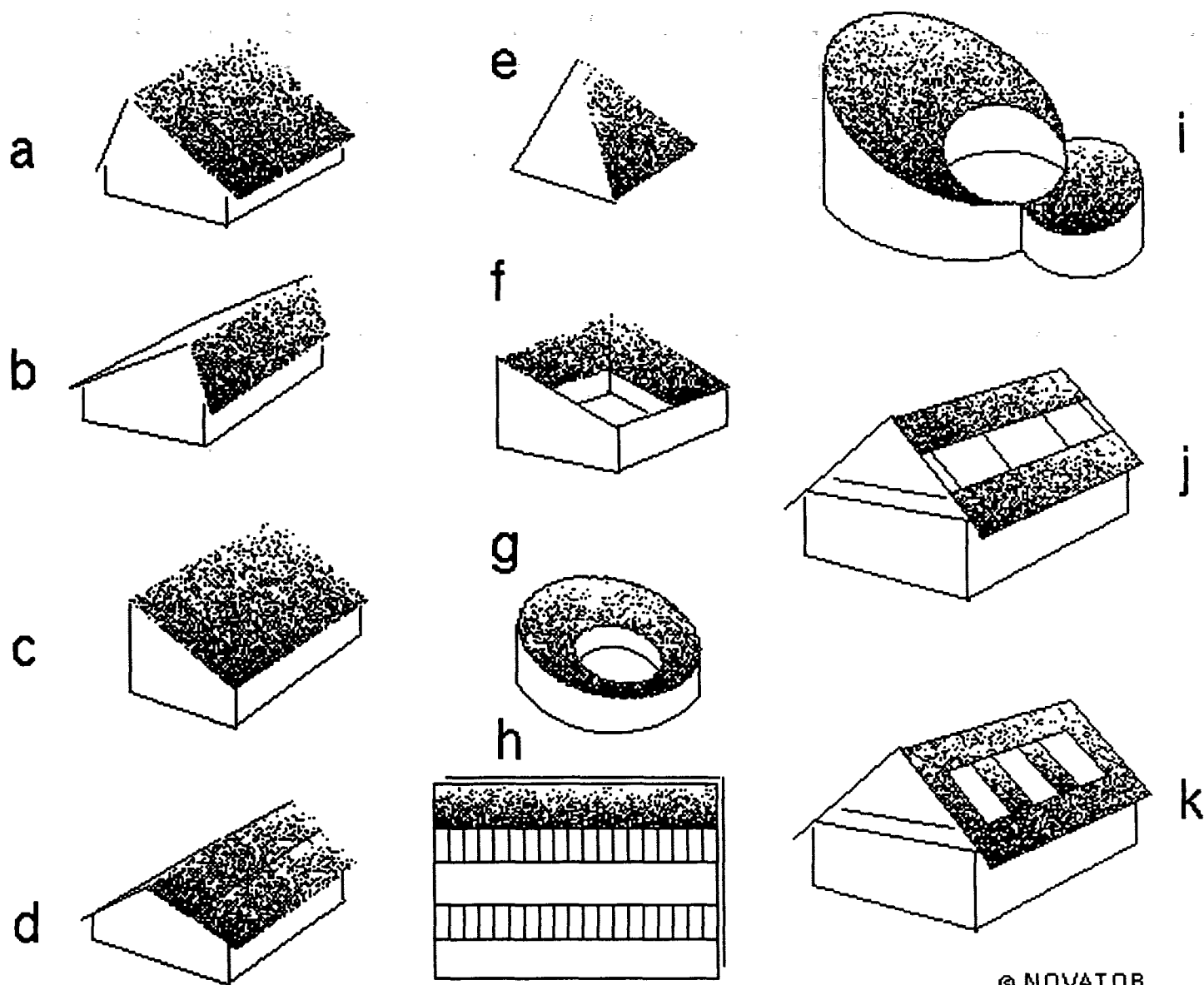
1.3 Nogle forslag til principper for solcelleintegration

Det er måske for tidligt at opstille generelle forskrifter for, hvordan solceller bedst integreres i forskellige typer bygninger. Imidlertid er der nogle retningslinjer, som kan foreslås og evt. underkastes en nøjere diskussion, i en dialog mellem teknikere og arkitekter.

Nogle grundtanker er illustreret i Figur 25. Først er der integrering i tagfladen af et enfamiliehus. Denne tagflade skal vende mod syd, ihvertfald mere eller mindre. En afvigelse på 30 grader til den ene eller den anden side gør ikke stor forskel, men kommer man over 50 grader, begynder det at kunne mærkes. Også hældningen er vigtig, indenfor lignende intervaller, men her afhænger det i betydelig grad af, om man ønsker den maksimale årsproduktion, eller om det er vigtigt at sprede produktionen over så stor en del af året som muligt, også selvom det medfører en nedgang i udbyttet om sommeren. Det sidste kriterium fører til krav om mere lodret placering, som iøvrigt også kan forstærke afhængigheden af orientering væk fra syd. Under danske forhold er tagflader med hældning mellem 45° og 60° ganske anvendelige, mens tage med 30° hældning ikke er så hensigtsmæssige (Sørensen, 1979).

Som Figur 25a og b viser, vil der typisk være det kompromis, at hvis den sydvendte tagflade gøres større, så bliver hældningen for lille, og hvis man skaber en hældning over 60°, så bliver fladen for lille. Dette afhænger for et enfamiliehus naturligvis af, om overetagen udnyttes. Den bedste løsning synes at være tage med 45° hældning, idet der her dels er gode udnyttelsesmuligheder for tagetagen, og dels et rimeligt kompromis mellem hældning og tagfladestørrelse (Figur 25j og k). Her spiller det imidlertid ind, at det også er vanligt at placere dagslysvinduer på sydsiden af sådanne tagflader, hvilket kan give vanskelige integreringsforhold, afhængig af solpaneltype. En løsning kunne være at erstatte de lodrette vinduer (Figur 25k) med vandrette kæder (Figur 25j).

I tilfælde af, at der både ønskes placeret solceller og solvarmepaneler på den sydvendte tagflade, så kan de placeres som vist i Figur 25d, i to baner over hinanden. Imidlertid gælder det også her, at de lave tagrejsninger ikke er så hensigtsmæssige, omend de jo



© NOVATOR

Figur 25. Idékatalog for integrering af solceller i bygninger (fortrinsvist enfamiliehuse, undtagen h).

kan anvendes for brugsvandsfremstilling i sommerperioden.

Figur 25e, f, g og i viser nogle alternative bygningstyper med mulighed for placering af solceller. Pyramideformen er egentlig ideel, men har ikke vundet videre indpas i det danske arkitekturbillede. Derimod er atriumhusene ikke helt usædvanlige, omend de er mindre anvendt i enfamiliehuse end i større enheder. De giver mulighed for at beklæde en del af de indre tagflader med solpaneler, forudsat naturligvis at de vælges at have hældning den rigtige vej, og helst med en udformning, så den modstående byfningsdel ikke skygger for meget. Dette er et generelt problem for enfamiliehuse, som jo normalt befinder sig så lavt i landskabet, at skygge fra andre bygninger, bygningsdele eller træer kan vanskeliggøre solcelleplacering.

For etagebyggeri er mulighederne større, idet man dels kan anvende alle tagfladeløsninger, og dels kan placeres solceller på bygningens øvre sideflader, nemlig dem der vender mere eller mindre mod syd. Hele spørgsmålet om placering af bygninger efter solen er uhyre vigtigt, og det er beklageligt, at anlæg af veje og parceller stort set ikke har taget sådanne hensyn, således at det er få steder, at en placering parallelt med skel er ideel for solenergiforsyning.

Det generelle arkitektoniske princip for placering af solceller må være at indtrykket ikke må være af en påklistret bygningsdel, men at solpanelerne skal erstatte andre byggematerialer. Dette gælder både facader og tage. Anvendelse af solceller til at skabe mønstre skal ske med en vis tilbageholdenhed. Den på Figur 8 viste udformning bliver hurtigt trættende, hvis der er for mange af den slags huse, medens løsninger af typen vist (indefra) i Figur 19 kan anvendes generelt.

I mange af de lande, som er længst med solcelle-demonstrationsanlæg, ses det at man har lagt vægt på, at offentlige bygninger går foran. Fx. er det i Schweiz bevidst, at mange skoler forsynes med solceller, ikke mindst på grund af den pædagogiske funktion.

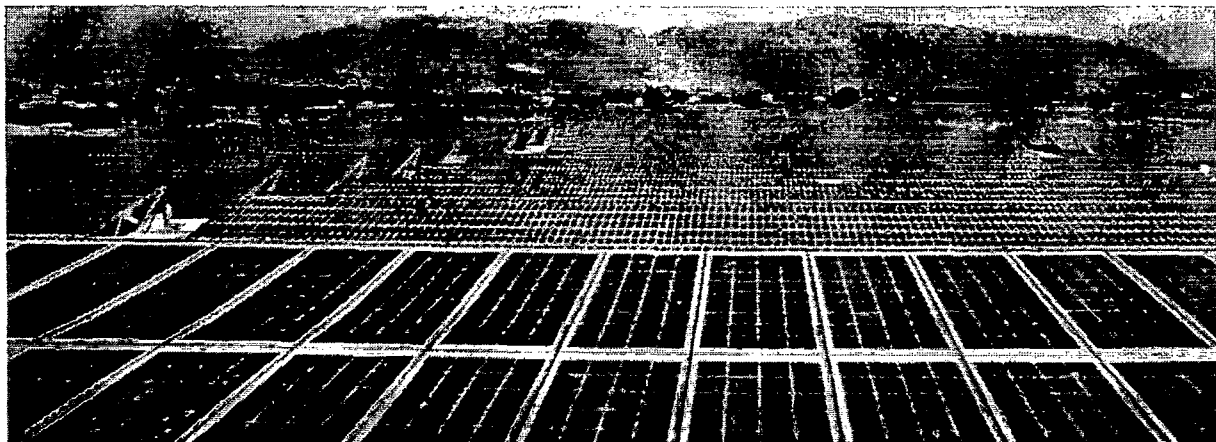
Selve solcelle-panelerne giver også anledning til nogle design-betragtninger. Dels er der fremtrædelsesformen, fra krystallinske cellers blålige og de amorfe cellers mørkegrå overflader til polykrystallinske cellers flammende overflader i forskellige blå nuancer. De gennemsigkelige amorfe celler har desuden nogle lysfænomener i retning af purpurrøde refleksioner (se Figur 17a). Desuden er monteringen i moduler meget forskellig: Krystallinske celler fødes cirkulære og mange moduler har de cirkulære celler placeret i et mønster på fx. en lys baggrund. Nogle har skåret fire sider til, så cellerne kan pakkes tættere, men stadig med afrunding i hjørnerne. Skal hele arealet dækkes med krystallinske celler, skal cirklen skæres ind til en firkant, hvilket betyder tab af dyrt fremstillet materiale. De samme forhold gør sig gældende ved nogle polykrystallinske moduler, men de fleste moderne enheder er nu firkantede. Hvad angår de amorfe celler, kan de produceres i store mål, hvilket gør at de ikke behøver at udvise den struktur, som sammenføjninger vil medføre. De amorfe celler kan også produceres i tynde ark, som kan foldes ud over komplicerede overflader, og om nødvendigt skæres til i kanterne (dette skal dog ske på fabrikken og ikke med hobbykniv!).

2. PROJEKTER

2.1 Italien

2.1.1 Verdens største solcellekraftværk

Forskningsafdelingen i det italienske elselskab ENEL har i mange år været meget positiv overfor solcelleværker. Der er i Italien installeret en række mindre anlæg (fx Figur 23), samt flere store, centrale solcelle-stationer tilsluttet elværkerne. Hidtil er finansieringen delvist kommet fra EU programmer, men det nye 3.3 MW solcelleanlæg ved Serre nær Pæstum er finansieret af ENEL selv. Der er anvendt celler fra en række forskellige fabrikanten, men opsætningen af paneler og produktion og testning af de sammensatte enheder er sket hos ENEL, som herved har udviklet en teknik til kvalitetssikring og billiggørelse af opstillingen, der skønnes at kunne reducere denne del af prisen på fremtidige anlæg med 25-50% (Iliceto, 1994). De samlede omkostninger for Serre-anlægget har været 6500 ecu/kW(spidsydelse) (Iliceto et al., 1994). Anlægget, der ses på Figur 26, er taget i brug januar 1995. Et omfattende monitoringsudstyr og programmel er installeret, og på området findes en solcelledreven "tankstation" til elbiler.

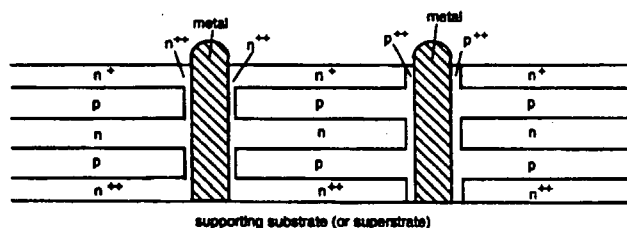


Figur 26. Solcelleanlægget i Serre, Italien.

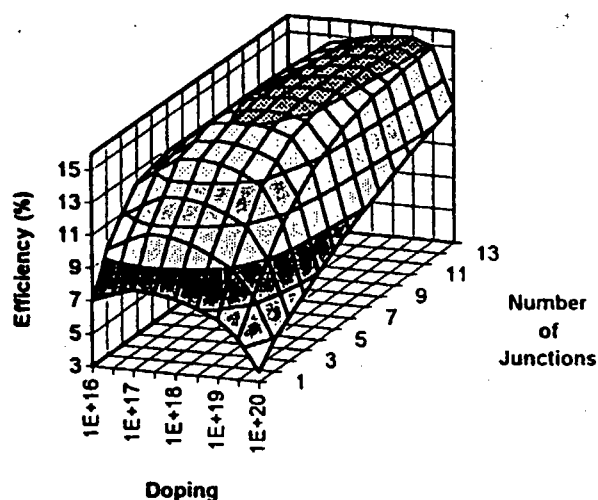
2.2 Australien

2.2.1 Stakkede polykrystallinske celler

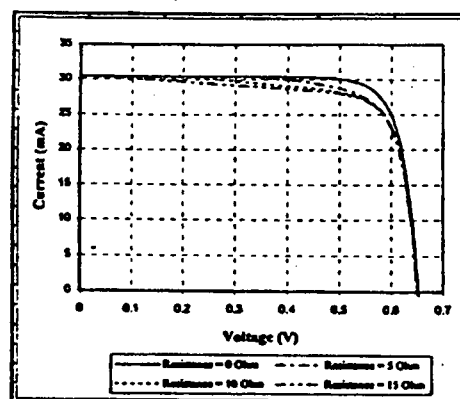
Figur 30 viser en metode til produktion af stakkede, polykrystallinske celler med 6 lag og kraftige kontakt-render, udviklet af Martin Greens gruppe i Sydney. Ideen er at benytte lavkvalitetskrystallinsk silicium i så tynde lag, at chancen for rekombination i hvert lag er lille. Hvert andet lag er p- eller n-dopet, som vist i Figur 27. Effektiviteten er beregnet som funktion af antal lag og dopingsgrad af materialerne i hvert lag. Som det ses på Figur 28, findes maksimum netop ved ca. 6 lag og en dopingskoncentration på omkring 10^{18} . Den forventede virkningsgrad er vist på Figur 29's strøm-spændingskurver med antagelser om modstanden ved overgang mellem lagene. Der pågår et intenst arbejde med fuldtud at karakterisere, hvordan den stakkede celle virker, og at verificere den industrielle fabriktionsmetode. Overslag viser at en prisreduktion på mere end en faktor 5 relativt til enkelte celler med højkvalitets krystallinsk silicium skulle være mulig.



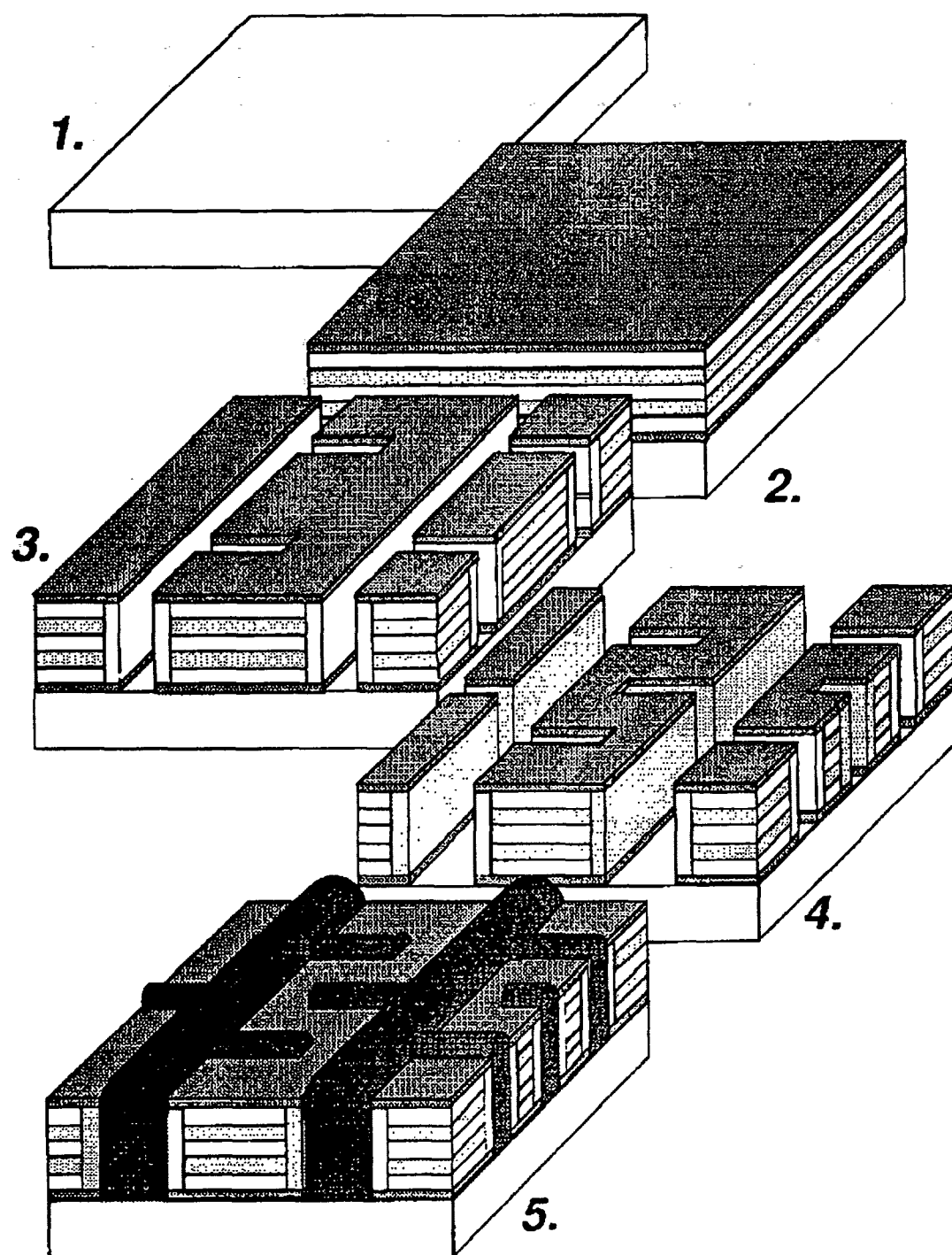
Figur 28. Lag-struktur af stakket celle med alternerende dopning (Wenham et al., 1994).



Figur 29. Celle-effektivitet som funktion af dopingsgrad og antal lag i den stakkede celle (Wenham et al., 1994)



Figur 30. Beregnet effektivitet af multilagscelle som funktion af en antaget modstand ved overgangen mellem lagene (den største modstand giver den laveste af de 4 kurver) (Hornsberg et al., 1994)



Figur 27. Stakket polykrystallinsk celle med kontakt-udformning og produktionsmetode (skridt 1-5) foreslået af Centre for Photovoltaic Devices and Systems i Sydney.

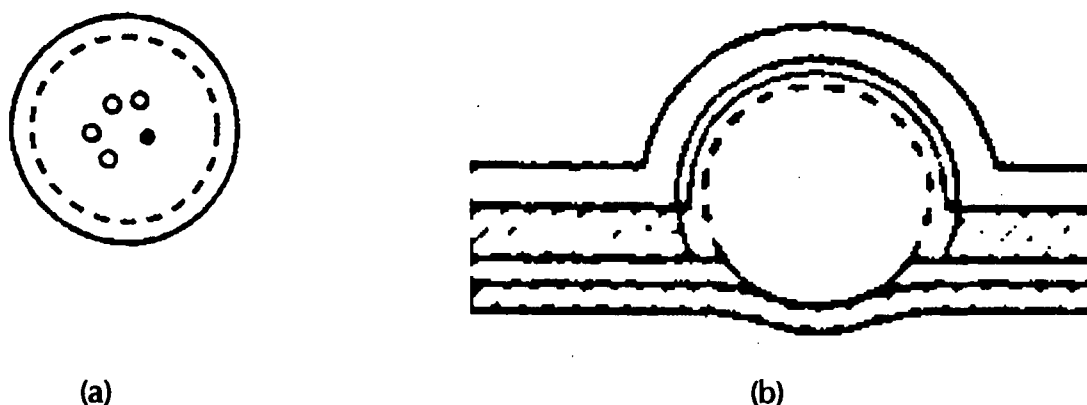
2.3 USA

2.3.1 Omstrukturering af solcelleforskningen og nye ideer.

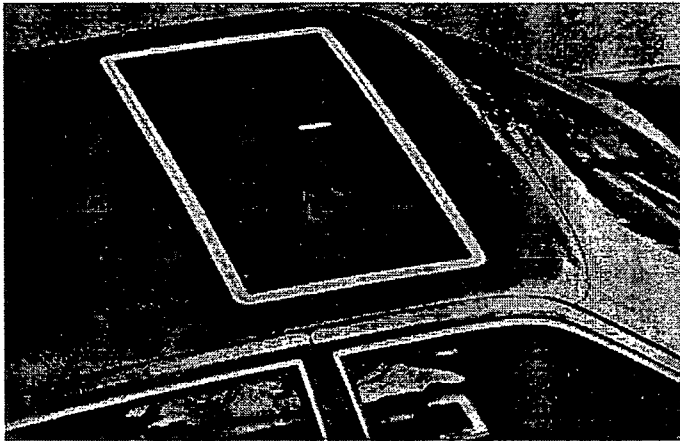
De californiske elværker (primært PG&E) var tidligere førende indenfor solcelleforskning, med en stor forskningsafdeling og flere store demonstrationsprojekter. Efter at en retssag har afgjort, at det ikke er rimeligt at elværket anvender kundernes penge på forskningsprojekter der ligger forud for gennemsnittet af hvad amerikanske elværker satser, er forskningsafdelingen nedlagt og solcelleprogrammet afbrudt. Imidlertid er USA jo et land med mange facetter, og andre elværker som fx Idaho Power har til gengæld vist en stigende interesse for solceller. De kan imidlertid forsvare sig med, at der i Idaho er mange potentielle kunder langt fra eksisterende forsyningsnet, hvor det kan betale sig for både kunden og elværket at installere solceller istedet for at forlænge nettet. Generelt ser det sort ud for forskning og udvikling på kraftværksområdet i USA, især efter det seneste midtvejsvalg. Der er ikke noget der tyder på, at regeringen har påtaget sig at levere de investeringer, som elværkerne nu er afskåret fra at foretage.

Enkelte nye ideer kommer dog frem, som fx Texas Instruments forsøg på at lave billige solceller ud fra affald fra mikroelektronikindustrien. Silicium-affald i form af små, uregelmæssige partikler gives først et oxid-lag i en højtemperaturovn, hvor stumperne også antager en perfekt kugleform. Ved langsom afkøling dannes énkrystaller og forureninger fortrænges til ydersiden, hvor de lader sig fjerne eller inaktivere ved kemisk behandling (fig. 31a). Nu placeres kuglerne på en aluminiumplade, hvor der er udstanset et antal huller. Ved ætsning bringes kuglernes p-lag til at stikke frit ud under hullerne, og de sædvanlige isoleringslag af plastfolie pålægges. En anden aluminiumsplate danner kontakt til n-laget (p-laget borede sig selv ind mod den første aluminiumsplate), og cellen er færdig (Figur 31b). Virkningsgrader på omkring 10% er nået (Mag, 1993).

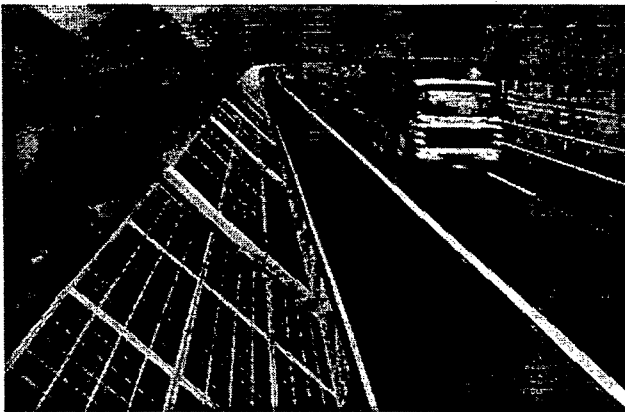
USA's største solcellefabrikant, Solarex (hvis Siemens USA ikke medregnes som amerikansk) har udviklet et køleanlæg til bilar (Figur 32), som sikrer at bilen ikke er varm indeni, efter at have stået parkeret i solskin.



Figur 31. Til venstre en Texas Instruments kugle efter at urenheder er fjernet og yderlaget dopet. Til højre er kuglen placeret mellem ledere med isolering imellem.



Figur 32. Solcelledrevet ventilationsanlæg monteret på biltag.



Figur 33. Solceller monteret på autoværn i Schweiz.

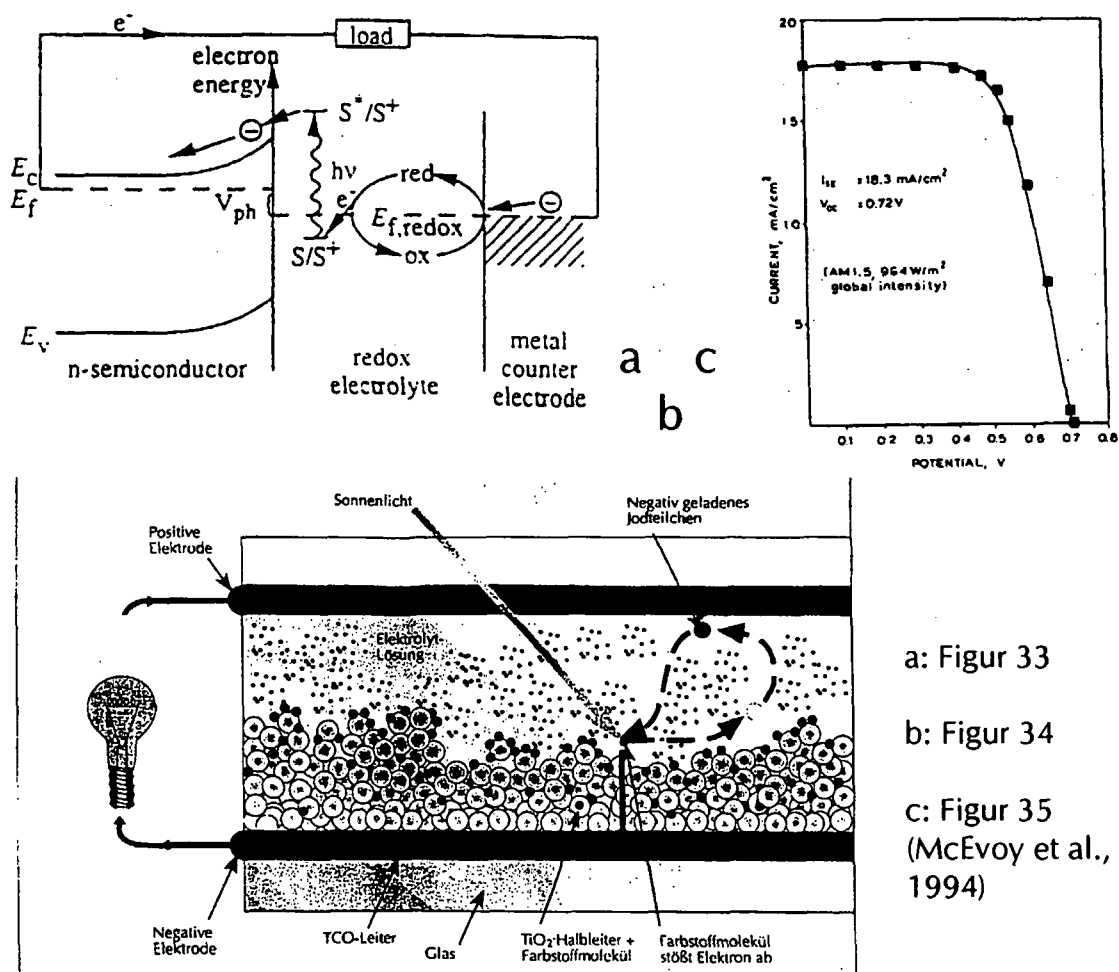
2.4 Schweiz

Schweiz har satset bredt på en lang række solcelleanvendelser, som fx. installering langs veje (Figur 32). Imidlertid foregår der også forskning i utraditionelle typer af solceller.

2.4.1 Solceller baseret på organiske farvestoffer.

Fotokemisk energilagring er den metode, grønne planter omsætter solens energi til oplagret energi på. Den oplagrede kemiske energi kan derefter anvendes når planten har brug for det. Anvendelsen af dette princip til kunstig opsamling og lagring af solenergi har været forsøgt flere gange, fx af Melvin Calvin (1974) (se Jensen og Sørensen, 1984).

Det seneste forsøg er foretaget på Michael Grätzels laboratorium i Lausanne (O'Regan og Grätzel, 1991). Her udnyttes et farvestof (et Ruthenium kompleks), der er følsomt overfor frekvenserne i sollys, og derved kan flytte elektroner ligesom i en diode eller fotosyntesen i planter (Figur 33). Princippet er udnyttet i en solcelle af den i Figur 34 viste struktur. Indtil nu har problemet været levetiden af farvestoffet, men det er nu lykkedes at demonstrere levetider på over et år, og effektiviteter over 7% (Figur 35). Forskellige firmaer er gået ind i arbejdet med anvendelser på forskellige skalaer, fra levering kraft til ure til kraftværker. Det er dog endnu for tidligt at sige om det lykkes.



a: Figur 33

b: Figur 34

c: Figur 35
(McEvoy et al., 1994)

2.5 Japan

Kobe-jordskælvet i 1994 ramte Rokko Island solcelle-prøvestationen (omtalt i Statusrapport 2), som er blevet en del beskadiget. Iøvrigt fortsætter det nye Sunshine program på fuld kraft.

2.6 Tyskland, Holland, Frankrig, England og Finland

Tyskland fortsætter den udvikling som blev startet med "De tusinde tages" solcelleprogram. Figur 36 viser en solcelledrevet tankstation for elbiler. Tyske installationer er herudover vist i Figurerne 3, 4, 14, 15, 19 og 21 (Forschungsverbund Sonnenenergie, 1993). I Holland er der også kommet gang i solcelleprogrammet, efter at EU's solcellekongres blev holdt i Amsterdam i april 1994. Udover bygninger arbejdes der også med solceller på husbåde og pramme (Figur 22). I en lang række lande er solceller den foretrukne kraftkilde til bøger og lignende installationer i rum sø. Alternativet er en langt hyppigere udskiftning af batterier. (Figur 24 er fra Frankrig, hvor solkraften også benyttes til parkbelysning i Sophia Antipolis og isolerede bygninger i bjergegne, som cykelmuseet i Pyrenæerne, se Thermie Program Action, 1993). England har fået sit første store solcelleanlæg integreret i en bygning (Figur 18), og i Finland har firmaet Neste haft en vis succes med salg af solcelleanlæg til isolerede fritidshuse (Figur 2).



Figur 36. Soltankstation ved Hannover messen (Fraunhofer Institut 1989).

3. REFLEKTIONER

Solcelleteknologien er ikke idag en færdigudviklet teknologi, som man uden omtanke kan gå hen og bruge. Det sker hele tiden ikke bare forbedringer, men gennembrud af videnskabelig og teknisk natur, og sådanne gennembrud er også nødvendige, hvis anvendelsen af solenergi i stor stil skal være økonomisk attraktiv.

Netop det forløbne år har oplevet en række af interessante gennembrud. Det mest lovende er i mine øjne Martin Green's stakkede polykrystallinske celler, som nu på laboratorieniveau har demonstreret en rimelig høj effektivitet med celler som er lavet af silicium materialer der er af ca. 20 gange lavere kvalitet end de der bruges i enkeltlags-celler. Dette medfører løfter om ikke blot en marginal prissækning, men om en reduktion med en faktor 4-6 på en gang. Om der vil vise sig vanskeligheder i produktionsfasen vil naturligvis vise sig, men lovende er tiltaget, og det er simpelt nok til at man kan håbe på en kommercialisering indenfor det nærmeste tiår.

Der foregår desuden flere ukonventionelle ting. Andre grupper arbejder også med anvendelsen af billige lav-kvalitets materialer, både til traditionelle celler og til celler baseret på organiske paralleller til planternes solindfang. Om disse tiltag bliver af betydning afhænger at de nye celletypers levetid og stabilitet, som ikke idag er kendt med sikkerhed. Også de kugleformede celler udviklet i USA er et eksempel på forsøg på at anvende lav-kvalitets materialer og alligevel opnå acceptable virkningsgrader. De nærmeste år bliver meget spændende for solcelleteknologien.

På en helt anden front sker der noget, som kan få indflydelse på solcelleteknologiens fremdrift. Det er den verdensomspændende omlægning af strukturen i elforsyningssektoren. Nøgleordene i denne udvikling er deregulering og privatisering, hvilket ofte dækker over et ønske om at åbne elsektoren op for konkurrence, dvs. at tillade nye aktører - uafhængige producenter - at komme ind på markedet. Sådanne uafhængige producenter omfatter naturligvis i princippet decentrale producenter af elektricitet fra vedvarende energikilder som fx solceller. Hvordan vil de påtænkte omlægninger generelt påvirke udviklingen af vedvarende energisystemer?

På den positive vægtskål er naturligvis, at de overhovedet får adgang til markedet. Det har i nogle lande simpelthen ikke været muligt tidligere, fordi fx. et nationalt elselskab havde monopol på såvel produktion, transmission og levering af el. I Danmark er en række alternative producenter allerede kommet ind på markedet (mindre kraftvarme anlæg og elproduktion udfra vind eller biomasse), men aftaler om salg til net og fordeling af tilslutningsomkostninger har ikke været entydige eller led i nogen totalt gennemtænkt planlægning (med hensyntagen til sådanne forhold som transmissionsbesparelser og kapacitetskredit).

Imidlertid konkurreres der ikke på lige vilkår, idet de eksisterende elselskaber har opbygget deres kapacitet på grundlag af tilladelsen til at opkræve tekster som indeholder henlæggelser til fremtidige investeringer, mens uafhængige producenter har måttet låne investeringskapital til markedsrenter. Afregningsreglerne fra vindkraft synes dog at tage højde for nogle af disse forhold.

Set udfra et energipolitisk synspunkt kan man frygte, at de nye energikilder, som skal være med til at løse miljøproblemer fremover, og som idag er på vej men skal støttes for at komme ind på markedet, vil få ringere vilkår i en konkurrencebaseret elsektor. Hvorledes skal samfundet sikre, at konkurrencen sker med hensyntagen til indirekte udgifter fra elfremstilling og -brug, og hvordan skal fornyelsen af energisystemet kunne sikres?

En mulighed vil være at beskatte forurenende energiformer mere end forureningsfri, som det allerede i en vis udstrækning sker idag. Imidlertid bør forskellen i skat reflektere seriøse forsøg på at opgøre de indirekte udgifter (fx. gennem en livscyklus analyse), og der bør også sættes skat på ulemper ved visse energiformer i forhold til forsyningsikkerhed, globale relationer, beskæftigelse, ulykkesrisici, osv.

En umiddelbar konsekvens af deregulering er, at elselskaberne ikke længere vil bruge midler på forskning og udvikling, udover hvad der er strengt nødvendigt af konkurrencehensyn. Det betyder umiddelbart, at samfundet vil blive pålagt flere udgifter og må hæve skattetrykket, for at sikre at der sker en løbende teknologisk forskning og udvikling på energiområdet.

Der er naturligvis muligheder for at agere anderledes. Fx kan beskatningen af energisektorens miljøpåvirkninger mm. øremærkes til F&U indenfor områder, der giver forhåbninger om udvikling af mindre forurenende energiformer og anvendelsesmønstre. En sådan tilbageføring af skatter til bestemte formål skal ske pr. automatik, og ikke som del af årlige finanslovsdebatter, hvis det skal have en positiv indvirkning på udviklingen af alternative løsninger. Grebet rigtigt an vil en sådan ordning kunne give bedre vilkår for alternativ energiforskning og udvikling.

Derimod er det ikke sikkert, at det løser problemet med nye agents indtræden på markedet. Når en ny teknologi er ved at være markedsmoden, men stadig er lidt dyrere end de traditionelle energityper, så har samfundet hidtil kunnet støtte ved at financiere demonstrationsanlæg og har derved givet industrien den nødvendige fremdrift i produktionsvolumen, som på sigt fører til billiggørelse af teknologien. Hidtil er en del af denne støtte tilvejebragt ved at pålægge elselskaberne at investere i demonstrationsanlæg. I en struktur som den vi ser i England, Norge, USA eller New Zealand må staten overtage finansieringen af sådanne demonstrationsanlæg, fx via miljøskatterne.

Det ses således, at betegnelsen "deregulering" er dårligt valgt, idet der skal en øget regulering til, før et dereguleret elforsyningssystem kan fungere hensigtsmæssigt. Hvis elsektoren omlægges efter mønstrene set i udlandet, uden at de problemer der er forbundet med indirekte omkostninger og fornyelse af teknologierne er løst, så kan der blive tale om et alvorligt tilbageskridt i forhold til målsætninger, som ellers har ligget dybt forankret i bl.a. den danske regeringspolitik.

Den danske elsektor består af et par elværkssammenslutninger, hvis medlemmer er en blanding af private og kommunale værker. Altså i en vis forstand et privat selskab, men med godt 50% offentlige aktionærer. Imidlertid er der tale om koncessionerede foretagender, idet hverken salgspris eller investeringer kan besluttet selvstændigt. Der er på den ene side et elprisudvalg og på den anden side en stram energipolitik og energilov-

givning, som elselskaberne skal følge.

En dansk model for omlægning af elsektoren kunne indebære, at staten overtager transmissionsnettet (hvor der jo ikke kan skabes meningsfuld konkurrence), og at alle producenter stilles lige overfor dette distributionsselskab. En sådan ligestilling indebærer, at de fordele som de eksisterende elværker har i form af akkumuleret kapital og det eksisterende produktionsapparat, må neutraliseres relativt til forholdene for nye agenter. Det kunne ske ved at staten overtager disse midler (som jo er frembragt via de offentligt koncessionerede el-rater) og lejer kapaciteten ud, tilbage til elselskaberne. Alternativt kunne der lægges en energiskat på de etablerede elværkers salgpris, som ud over den ovenfor nævnte miljøskat indeholder en kapitalskat svarende til bidraget til elprisen fra den eksisterende produktionskapacitet samt et bidrag der modsvarer fordelene ved kapitalakkumulationen i fortiden. Uden en ordning som tilgodeser disse hensyn, vil nye operatører selvsagt ikke kunne påstås at have fået fair konkurrencebetingelser.

LITTERATUR

Calvin, M. 1974. *Science* vol. 184, pp. 375-381.

Forschungsverbund Sonnenenergie, 1993. *Photovoltaik 2*, Köln.

Fraunhofer Institut, 1989. *Photovoltaics - made in Germany* (for Forskningsministeriet)

Hornsberg, C, Edmiston, S, Koshier, L, Wenham, S, Sprout, A og Green, M. 1994. Capitalizing on two-dimensional minority carrier injection in silicon solar cell design. *Proc. 1st World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion* (in Press)

Iliceto, A, 1994. pp. 259-270 i *Proc. Workshop on Modular PV Plants for Multi-megawatt Power Generation*, ENEL Roma

Iliceto, A, Previ, A, Arcidiacono, V og Corsi, S, 1994. pp. 271-274 i *Proc. Workshop on Modular PV Plants for Multimegawatt Power Generation*, ENEL Roma

Jensen, J og Sørensen, B. 1984. *Fundamentals of Energy Storage*. Wiley, New York

Maag, W. 1993. *Sonnenenergie & Wärmetechnik* no. 5/93, pp. 16-19.

McEvoy, A, Grätzel, M, Wittkopf, H, Jestel, D and Benemann, J. 1994. Nanocrystalline electrochemical solar cells. *Proc. 1st World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion* (in Press)

O'Regan, B, og Grätzel, M. 1991. *Nature*, vol. 353, pp. 737-739

Sørensen, B. 1977. *Danmarks Vedvarende Energikilder* (p. 1-58). OVE og OOA, København

Sørensen, B. 1979. *Renewable Energy*. Academic Press, London

Thermie Program Action, 1993. *Photovoltaic Technologies and their future potential*. EAB, Berlin (for EU DG XII)

Wenham, S, Green, M., Edmiston, S, Campbell, P, Koshier, L, Hornsberg, C, Sproul, A, Thorpe, D, Shi, Z. and Heiser, G, 1994. Limits to the efficiency of silicon multilayer thin film solar cells. *Proc. 1st World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion* (in Press)

Appendix A.1

I nedenstående liste er anført aktiviteter relateret til dette projekt. Det betyder ikke at Energistyrelsen har finansieret alle de nævnte samarbejdsprojekter og -rejser. Ligesom i de foregående to rapporter er alle aktiviteter, som har bidraget til materialet i dette skrift, medtaget. I mange tilfælde er finansieringen sket fra den udenlandske organisations side, eller fra andre internationale kilder.

April 1994:

Diskussion med Prof. R. Hill og A. Baumann (Univ. Northumbria, Newcastle) og Prof. A. Luque og M. Alonso (CIEMAT, Madrid).

Diskussion med Drs. H. Outhred, M. Watt og M. Green (UNSW, Australian).

Diskussion med E. ter Horst og E. Lysen (NOVEM, Holland).

(Bent Sørensens deltagelse i EU's solcellekonference i Amsterdam)

Maj 1994:

Diskussion med T. Bruton (BP Solar), N. Kaiser (Kaiser Bautechnik), J. Benemann (Flag-sol), R. Booth (Shell Int.), B. Chabot (ADEME) og P. Varadi (Solarex).

(Bent Sørensens deltagelse i European Solar Councils møde, Grækenland)

August/September 1994:

Samarbejde med J. Kaye (UNSW, Australien)

(J. Kayes besøg ved Roskilde Univ.).

Diskussion med L. Kazmerski (NREL, Colorado)

(Bent Sørensens deltagelse i WREN styrekomité-møde, Reading)

September 1994 og Januar 1995:

Diskussion med R. Vigotti (ENEL, Italia), P. Toggweiler (PMS energie, Schweiz), J. Harford (BP Solar), R. Sellers (US Solar Energy Industries Ass.), K. Rabago (US Department of Energy), J. Iannucci (Distributed Utilities Ass., California), G. Nakarado (NREL, Colorado).

(Bent Sørensens deltagelse i to møder i Organising Committee for 1995 Sun Valley Conference)

December 1994:

Diskussion med S. Wenham, M. Watt, M. Green og J. Kaye (UNSW, Australia).

Diskussion med Prof. G. Wrixon (Ireland), A. Baumann og R. Hill (Newcastle)..

Diskussion med A. Kitamura (Rokko Island, Japan).

(Bent Sørensens deltagelse i Solcellekonference, Kona)

DANISH NATIONAL PHOTOVOLTAIC PROGRAM

Ivan Katic, Danish Technological Institute, PO Box 141, 2630 Tåstrup, Denmark
Bent Sørensen, Roskilde University, PO Box 260, 4000 Roskilde, Denmark
Jens Windeleff, Danish Energy Agency, Landemærket 11, 1119 Copenhagen K, Denmark

ABSTRACT

The paper describes the Danish PV-program and gives a more detailed description of four projects featuring innovative PV concepts: The Brædstrup demonstration of the first Danish produced crystalline cells, the Villa Vision project of the house of the future (circular house with controlled solar radiation gain and low environmental impact systems), the Toftlund Brundtland Center (including a day-lighting facility with PV-cells built into facade window elements, plus roofmounted PV-panels with graded inclination modules), and the Kolding balcony replacement project (including PV panels in damaged concrete restoration projects).

BACKGROUND

The Danish National Program for photovoltaics was formed around 1990 and stipulates a development, in which photovoltaics will gain an increasingly firm place in the marketplace over the next 10-20 years. The Danish Energy Agency, operated for the Department of Energy and Environment, formed a PV group with representatives from PV research and industrial interest groups, and established a program funding activities aimed at furthering the PV technology.

The relatively late entrance into a firm commitment in the PV area reflected the Department's view, that other renewable sources, such as wind and biomass options plus solar thermal, were closer to economic viability and thus would pay back the incentives much sooner than PV. The underlying assumption when this policy was formed in the 1970'ies was that the goal should be to get rid of the fossil fuel dependency as soon as possible. Today, Denmark has developed considerable amounts of gas and oil fields in the North Sea, and these are seen as transitional fuels that gives the country a more reasonable time span to develop alternatives, which are seen as important more for environmental reasons (including avoidance of greenhouse warming) than for reasons of shortage of conventional supply. Nuclear power has been removed from Danish energy policy by an overwhelming majority in parliament.

POLICY BASIS

The Danish perspective on the development of PV applications envisages a progressive penetration, first into

niche areas and later into major electric energy applications. Among the niche areas, some are already economic at present PV costs (e.g. telecommunication repeater stations, light buoys and isolated traffic signs), while other areas are expected to open up over the next few years (e.g. powering vacation homes and campers). Utility grid applications are not expected to become viable in the next decade, but preparations have to be made in order to ensure a smooth introduction once PV becomes ready for general electricity supply. It is the Danish view that this will happen only in a decentralized fashion, with panels integrated into building roofs and facades. Because much of Denmark's solar radiation is diffuse, concentrating devices are not considered promising, and hence the central PV station concept would have to be based on flat plate converters, where additional support and high land costs will destroy the competitiveness relative to building-integrated solutions.

Although the government PV program is relatively new, this does not mean that PV did not receive Danish attention earlier. PV research has been carried out at the Danish Technical University for over 20 years, and early demonstration projects have been installed by the Jutland Telephone Company (repeater stations in Denmark and Greenland, experimental house in Bramming, with an associated EU project for evaluating battery storage performance, see Figure 1). There is a dozen Danish vendors of modules and systems, and one cell manufacturer (Solel, producing crystalline cells of up to 15% efficiency with an innovative assembly-line setup).

CURRENT PROGRAM

Presently, a considerable number of demonstration projects are established or underway. We will mention a few, selected because they are believed to contain some features of general interest.

UTILITY EXPERIMENT

The 1993 Brædstrup installation is a 5.2 kW electric utility system, mounted on a building belonging to a local utility (see Fig. 2). It is the first to employ the Danish Solel cells. A gross collector area of 50 m² is obtained by 3 sections of 24 modules (each comprising 36 cells) mounted on a roof at 42° inclination. The inverter accepts 50 V DC and feeds into a 10 kV grid connection. The first set of modules were flawed and had to be replaced. The produc-

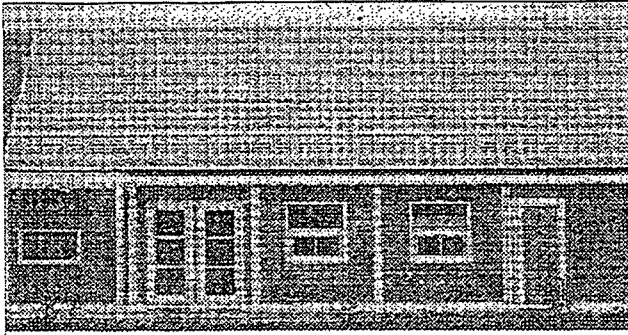


Fig. 1. Jutland Telephone Company's experimental PV house, built in 1984 [1].

tion with the new modules, in April 1994, was 353 kWh. The implied cost is about 5 DKr/kWh (some 0.7 ecu or US\$ per kWh), which agrees with expectations. For the entire year ending November 1st, 1994, a production of about 4000 kWh has been achieved, implying roughly the same power price for the annual average situation.

In Figs. 3-5, the measured performance of the installation in Brædstrup is shown, on a monthly, diurnal and hourly basis. The replacement of cells is evident from

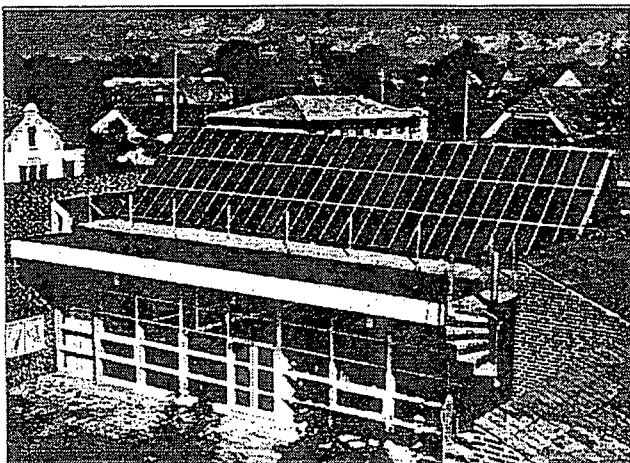


Fig. 2. Experimental PV installation of roof of building operated by a group of Jutland utilities [2].

comparing the September-October output in 1993 with the same months in 1994. The overall system efficiency is about 7%, with the mid-day value reaching 8% (Fig. 5). Inverter losses are 1-2% of incoming radiation.

DWELLING OF THE FUTURE

The Villa Vision was completed in mid-1994 at the Danish Technological Institute in Tåstrup. It demonstrates a long range of innovative energy technologies and includes a 36 module, 20 m² solar cell structure integrated

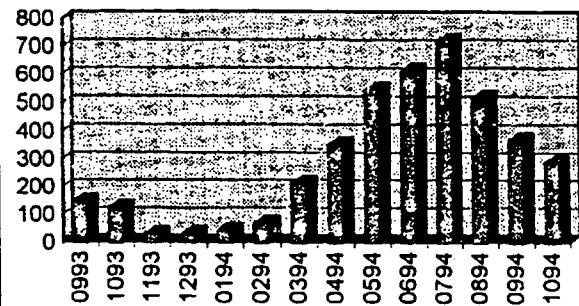


Fig. 3. Monthly average performance of Brædstrup installation September 1993 to October 1994 [2].

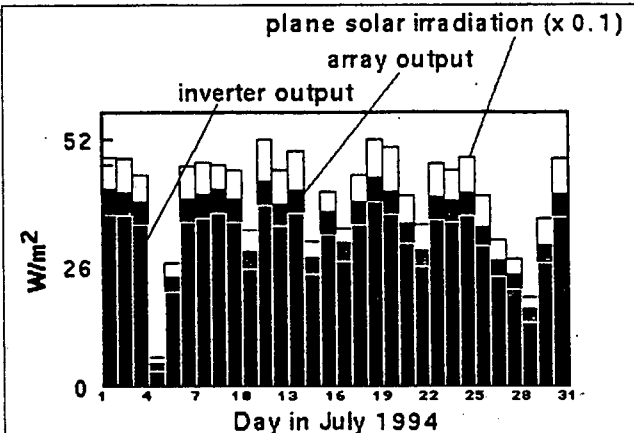


Fig. 4. July performance of Brædstrup installation [2].

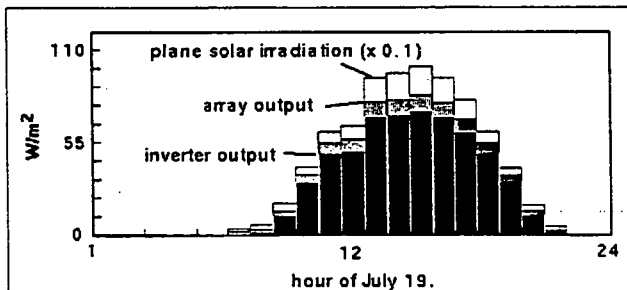


Fig. 5. Performance of Brædstrup installation on July 19, 1994. [2]

into the roof. The modules, which have a net efficiency of about 10%, have been tested at the Institute for about a year, before being mounted on the Villa. The expected annual production is 1930 kWh or 50% of the electricity need of the house. The cells would cover the household needs for electricity, but not the particular needs in this house of power for waste water cleaning, heat pumps and heat exchangers.

From May 93 until April 94 the PV system was tested on a test rig with 45° inclination, which is nearly optimal for

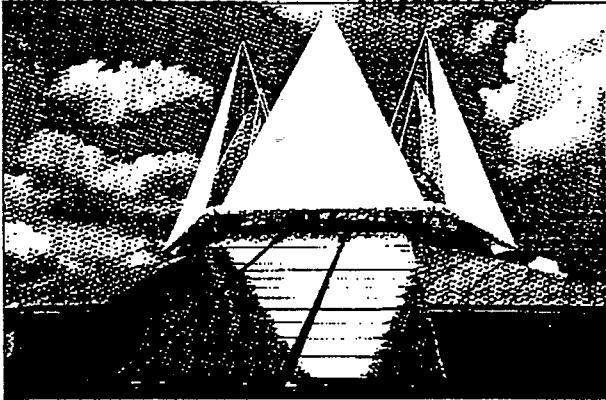


Fig. 6. The solar cells and solar thermal (top) panels mounted on Villa Vision.

the location. In general the operation of the plant did not cause any trouble, and the performance seems to be within the expected range. No cut-outs of the inverter could be found, and its efficiency is just slightly lower than claimed by the manufacturer (see Fig. 7). The nominal size of the inverter is about 15% lower than the array peak power, but the design allows dissipation of excess energy without damaging the inverter.

Key data for the first year is given in Table 1, and shows that the yield factor is in the upper range of what can be expected for small grid connected PV systems. The modules are selected to have almost similar characteristics, in order to minimize mismatch losses. If the data are recalculated for the reference year, the relative AC energy would be 0.83 kWh/Wp.

**Villa Vision PV system: 9x4 Solarex 64 Wp modules
ASP Top Class 1800 Grid single phase inverter**

Insolation in plane of array	20400 kWh
Energy from inverter	1677 kWh
Maximum power (AC)	1.94 kW
System efficiency	8.3 %
Annual performance factor	72 %

Table 1. Key data from one year of operating the Villa Vision PV system

Heavy cabling was used for the installation, which resulted in some practical problems mounting several cables and diodes in a small connection box. Due to insufficient distance between two cables, they short-circuited, and a small fire broke out in the insulation, causing limited damage.

In June 94 the system was moved to the experimental house, where it is mounted in a frame system including thermal solar collectors. The performance monitoring will continue for another year, while the house is inhabited

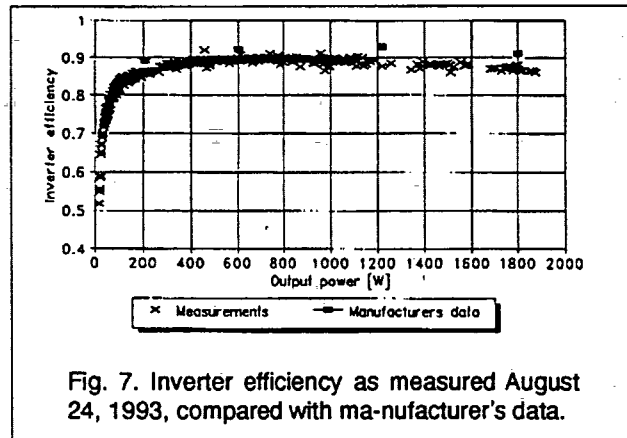


Fig. 7. Inverter efficiency as measured August 24, 1993, compared with manufacturer's data.

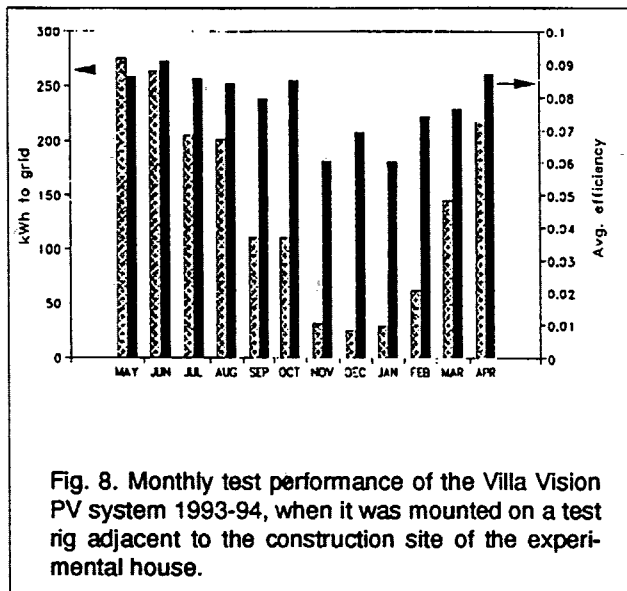


Fig. 8. Monthly test performance of the Villa Vision PV system 1993-94, when it was mounted on a test rig adjacent to the construction site of the experimental house.

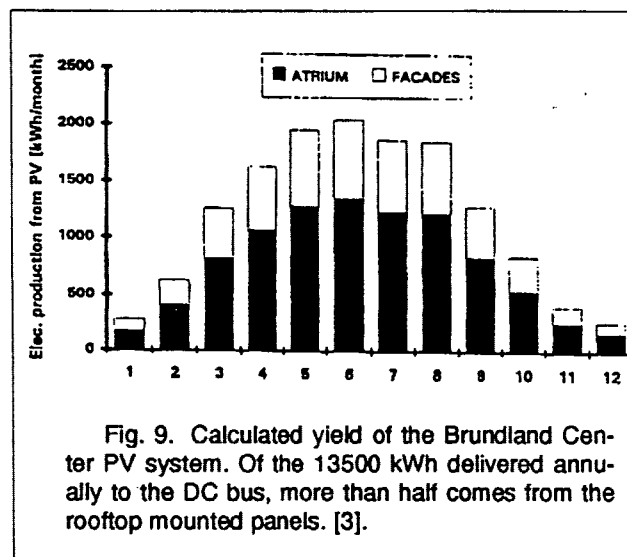


Fig. 9. Calculated yield of the Brundland Center PV system. Of the 13500 kWh delivered annually to the DC bus, more than half comes from the rooftop mounted panels. [3].

with a typical family.

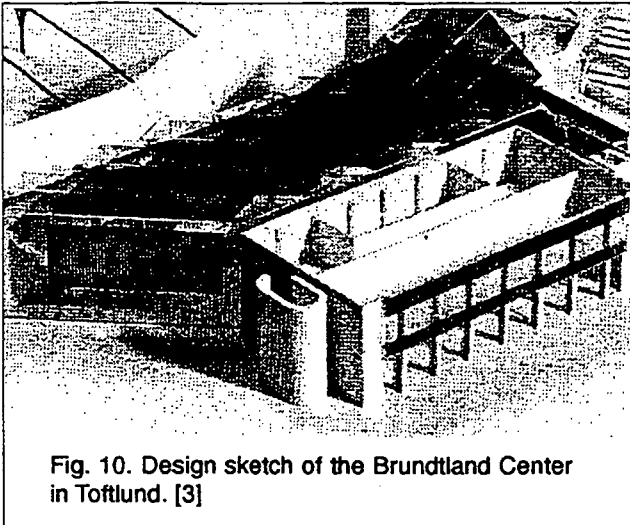


Fig. 10. Design sketch of the Brundtland Center in Tofthund. [3]

ECOLOGY CENTER

The Brundtland Center in Tofthund is one of a chain of centers for sustainable development, being established across Europe. The Tofthund convention and exhibition Center, which is under construction and planned to be inaugurated in mid 1995, incorporates a number of advanced energy features, including 130 m² of solar cells. Of these, 46 m² are covering part of the South-East facing building facade, using specially manufactured Solel modules, where the cells are arranged between two glass plates in such a way, that a 20% light admittance is permitted. The remaining PV modules will be part of an inclined, south-facing roof over an atrium area, for which sun shading is required. The inclination varies between 30° and 60° (increasing towards the back, in order to minimize shading).

Fig. 9 shows the calculated performance of the PV system. The orientation of the facade panels towards the east causes a fairly significant performance reduction.

RETROFIT OPPORTUNITIES

A large number of apartment building balconies built

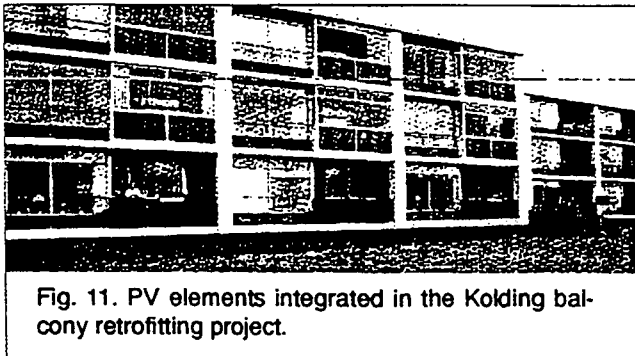


Fig. 11. PV elements integrated in the Kolding balcony retrofitting project.

during the post-World War II period is presently being remodelled, following detection of serious cracks in the concrete used at the time. The replacement is a fairly high cost operation, and the cost of adding PV cells to the balcony surface seems acceptable. Most of the balconies are facing South (+/- 45° acceptable), and one scheme in the town Kolding has been selected for a demonstration PV project.

Here six balconies were mounted with each a 50 Wp PV module, and the power is being fed into a central, grid-connected inverter. The modules are replacing coloured glass panes used in other parts of this renovation project. The modules are tightly connected to the frame profiles, but with natural ventilation on their rear side. The ensuing warming of the balcony air is expected to reduce heat losses from the building. Whether too much heating will occasionally occur, will be monitored as part of a one year measuring program.

The balconies are facing south-west, deviating by as much as 60° from the optimum orientation, which is expected to entail a substantial reduction in yield.

CONCLUSIONS

The Danish PV demonstration projects mark an interest by the government in moving towards a greater support for PV systems in the future, provided that the technical performance remains satisfactory and that cost reduction estimates hold in broad terms. It is expected, that an increased number of decentralized, grid-connected PV systems will be built during the next years, and that knowledge and interest in PV will increase accordingly. Already the present activities have shown, that there is a sufficient industrial base in Denmark for developing and delivering a wide range of PV solutions. The increasing incorporation of environmental factors in all Danish planning and decision-making processes will further enhance the interest in photovoltaics and other renewable energy options, relative to fuel-based energy systems.

The authors wish to thank Mr. F. Kristensen of the VOH Utility Corp. for communicating early performance data of the Brædstrup system. B.S. is supported by a grant from the Danish Energy Agency.

REFERENCES

- [1] B. Mortensen. "PV-Powered House in Bramming", pp. 474-585.
- [2] F. Kristensen, VOH utility, private communication.
- [3] C. Madsen and H. Sørensen, "Brundtland Centre in Tofthund Denmark". In Proc. ISES North Sun Conference, Glasgow 1994, pp. 229-234.

THE WAFFLE: A NEW PHOTOVOLTAIC DIODE GEOMETRY HAVING HIGH EFFICIENCY AND BACKSIDE CONTACTS

Otto Leistiko, Microelectronics Centre,

Building 345 East, Technical University of Denmark, DK 2800 Lyngby, Denmark

Tel: +45 45 93 12 22 5712 Fax: +45 45 88 77 62 e-mail: ol@mic.dth.dk

ABSTRACT

By employing anisotropic etching techniques and advanced device processing it is possible to micromachine new types of mechanical, electronic, and optical devices of silicon, which have unique properties. In this paper the characteristics of a new type of photovoltaic diode fabricated employing these processing techniques are described. This novel device has not only high efficiency, but also has both contacts placed on the backside of the cell. The first devices which are only 50 mm in diameter are of relatively good quality with low leakage currents (nA), high breakdown voltages (80V), and low series resistance (mohms). The measured efficiencies at AM 1.5 lie between 12 to 15 % with short circuit currents of 25 - 30 mA/cm², and open circuit voltages of 0.58 - 0.6 V.

INTRODUCTION

In the manufacture of photovoltaic diode panels it is necessary to connect a number of devices in series in order to obtain the correct operating voltage. For standard panels the number of cells required is most often 36. For the case of single crystal and multicrystalline silicon cell panels the devices are connected by soldering or welding a thin metal foil from the front side of one cell to the backside of the neighboring cell, continuing in this fashion until all cells are connected in series. This is at best a difficult task and a completely satisfactory automated process for this step the manufacture of silicon solar cell panels has not been devised. Were it possible to place both contacts to the diode on the backside of the device the task of interconnection would be simplified considerably and made more amenable to automated execution. Some attempts have been made to do this, e.g. the multijunction solar and the Polka Dot cell (1,2,3), but they have not been completely successful.

By employing some of the new techniques devised for the fabrication of silicon microsensors and micromechanical devices, new types of electronic, and

optical, as well as, mechanical devices can be made that are unique. In this paper application of these silicon, "micromachining", processes to the fabrication of a new type of photovoltaic diode with both contacts on the backside is described. The task of connecting the cells in series during the panel fabrication step is, thus, facilitated. As a matter of fact it should be possible to automate the whole process relatively easily by printing all interconnects on a supporting substrate and simply soldering all cells down on this. The name of this photovoltaic diode arises from the fact that the front side of the device actually looks like a "waffle". The structure which is achieved by anisotropic etching of {100} single crystal silicon through a photolithographically generated mask makes it possible to bring the front contact to the back of the cell and, furthermore, results in a corrugated front side with a reduced reflectivity and no metal contacts which reduce the area exposed to the sun. First, some design considerations are discussed, thereafter fabrication is taken up.

DESIGN CONSIDERATIONS

The geometry of the device is shown in Figure 1. It is immediately clear what has been done to place both contacts to the diode on the backside. By employing the micromachining techniques mentioned above holes having an inverted pyramid-like structure are etched into the {100} oriented silicon wafer. By photolithography and diffusion it is then possible to fabricate the structure shown. In addition to permitting both contacts to be placed on the backside of the diode this, "waffle", structure has a number of advantages. First, the active surface area compared with a normal cell is increased by approximately 2 times. Secondly, the average reflectance of the surface is reduced by the inverted pyramid structures, thus, improving the absorption of light. Next, since there are no metal contacts on the front surface, shadowing effects are reduced, again improving the absorption of light. Finally, since the waffle geometry reduces the volume of the cell, the collection efficiency of the electrons and holes generated, in particular at longer wavelengths, is improved.

FABRICATION

For the fabrication of the devices made for this study (100) oriented 10 ohm cm silicon wafers were used. Because of the deeply etched inverted pyramid structures, great care must be exercised in the fabrication since many of the processes are not compatible with the etching process. The first step is to etch the inverted pyramids in a 30 % solution of potassium hydroxide (KOH) in water at a temperature of 80 °C, leaving an approximately 25 μm thick membrane. Thereafter, the relatively deep boron and phosphorous contact diffusions are made at a temperature of 1150 °C. Next, the wafer is etched again this time leaving a thin membrane, the thickness of which is determined by the "etch-stop" action of the backside boron contact diffusion. Finally, the frontside boron diffusion is made, completing the device. The resultant structure is shown in the SEM microphotograph reproduced in Figure 2. There is a compromise involved in this last diffusion in that one would like to have a very shallow junction, but not so shallow as to increase the series resistance of the cell too much. A view of the front and back side of two finished devices is shown in Figure 3. The design does not make optimum use of the silicon area available but the advantages of this geometry are evident.

ELECTRICAL AND OPTICAL MEASUREMENTS

The first measurements taken on the finished devices were their electrical characteristics. The breakdown voltage (BV) of the diodes were measured to be 80 ± 10 V. Series resistance (R_s) values between 10 - 100 mohms were measured indicating considerable variation in the junction depths of the p diffusions. Groove and stain measurements, though not very precise, confirm these results. Leakage currents I_l in the

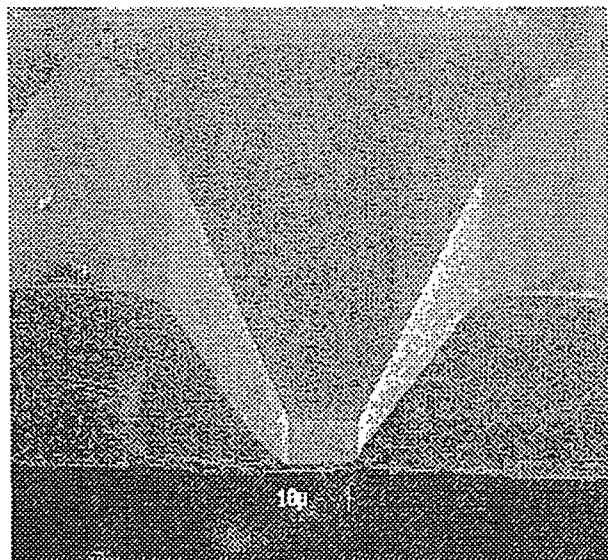


Figure 2. Seen here is a SEM picture of a Waffle photodiode cleaved in such a manner as to show the cross section of the device.

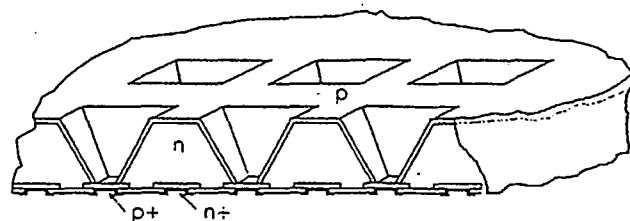


Figure 1. A sketch of a cross section of the Waffle photovoltaic diode showing the geometry. An indication of scale can be given by noting that both the wafer thickness of the devices and the distance between contacts is 300 μm .

nanoampere range and minority carrier lifetimes (τ_{rec} and τ_{diff}) of 10 - 50 μsec , determined from current - voltage measurements, indicate reasonably good control over the process and good quality material. The current - voltage characteristics shown in Figure 4, show an open circuit voltage of 0.58 V and a short circuit current of about 30 mA/cm^2 at AM 1.5, indicating a power efficiency of roughly 13 %.

CONCLUSIONS

A new single crystal silicon photovoltaic diode structure has been demonstrated that not only has relatively high efficiency (12 - 15 %), but also has both contacts on the backside of the device, thus, permitting simplified interconnection. This is not the only geometry that one could use for an efficient photovoltaic diode, but it is clear from this work that many attractive solar cell structures can be made employing advanced silicon micromachining techniques. However, it must be admitted that fabrication of these devices requires very advanced and complicated processing and the question arises as to whether or not photovoltaic diodes produced by these methods will ever be economically viable.

REFERENCES

1. A. Gover and P. Stella, "Vertical Multijunction Solar Cell One Dimensional Analysis", IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-21, p 351 (1974)
2. T.I. Chappell, "The V Groove Multijunction Solar Cell", IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-26, p 1091 (1979)

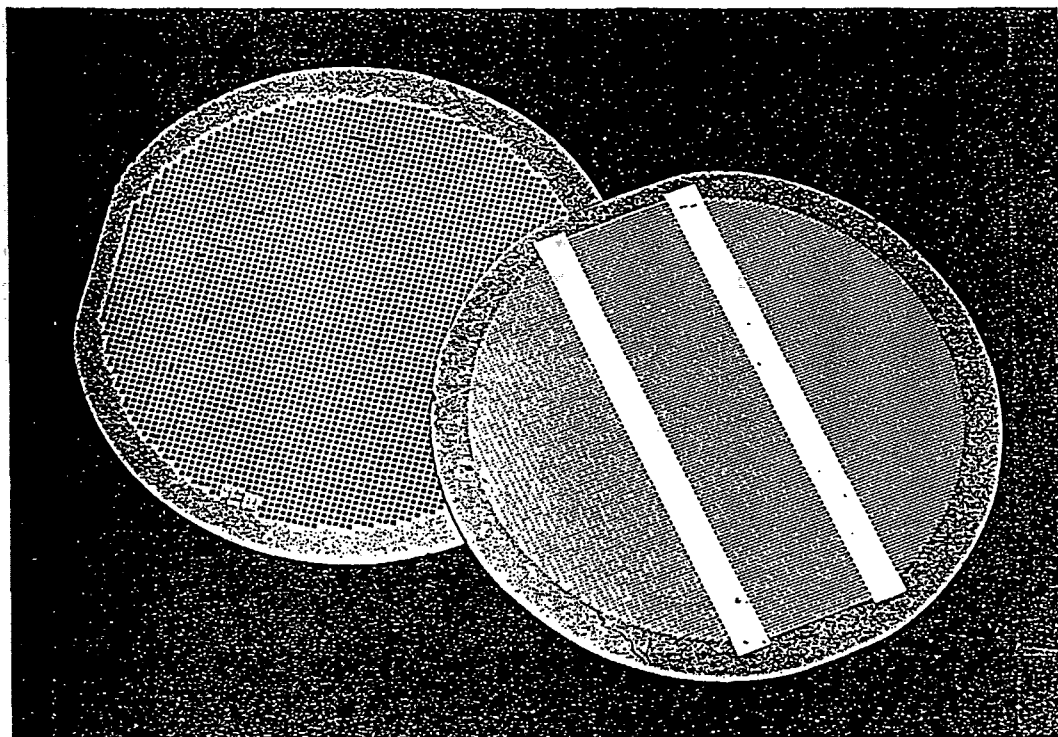


Figure 3. A photograph of two Waffle photodiodes showing the front and back geometries. Note how black the inverted pyramid geometry of the frontside appears.

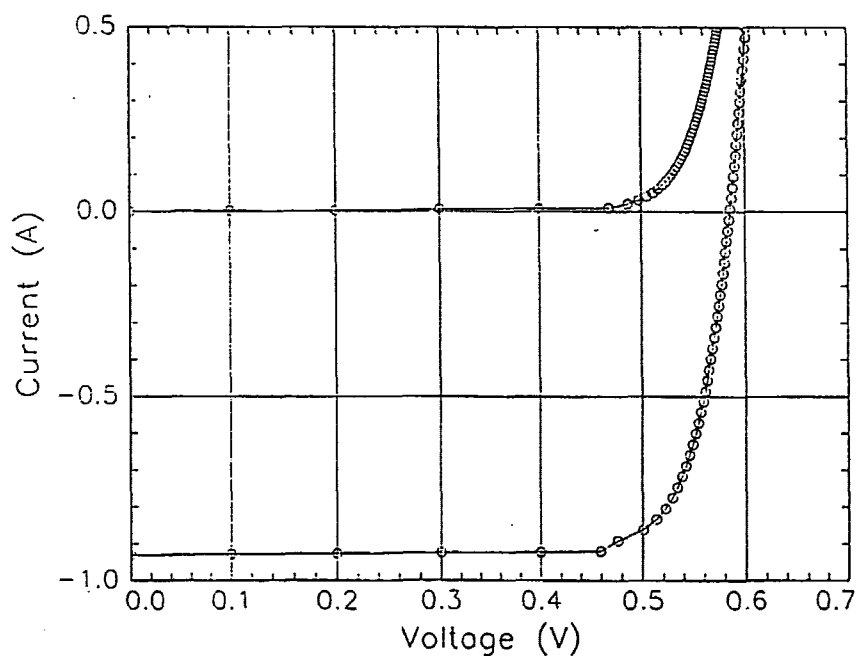


Figure 4. The current - voltage characteristics of the diodes were recorded on a HP 4145B Transistor Parameter Analyser. The device shown here has an efficiency of approximately 13% based on an estimated effective area of 30 cm² and a fill factor of about 0.75.